

# 微波可调谐超材料吸波体研究进展

周倩, 殷小玮, 张立同, 成来飞

西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室, 西安 710072

**摘要** 随着电磁波干扰防护技术与隐身技术的发展, 吸波材料已成为科学研究的重要课题。介绍了材料的吸波原理、吸波材料的分类及其特征, 总结了超材料吸波体在微波频段的应用研究现状, 综述了超材料作为可调谐吸波体的研究进展, 展望了超材料在可调谐吸波体中的研究趋势。

**关键词** 可调谐性; 微波; 超材料; 吸波体

吸波材料作为电磁波干扰防护技术与隐身技术的重要支撑材料, 受到世界各国的高度重视, 已成为国内外研究的热点<sup>[1-4]</sup>。超材料不仅能够满足吸波材料要求的“薄、轻、宽、强”的综合性能要求, 而且具有电磁参数可调的优势, 为吸波材料的研究提供了一个全新的思路。

超材料 (metamaterials) 是一种由亚波长结构单元组成的新型人工结构材料, 具有超常的电磁特性, 如负折射率、逆切伦科夫辐射和逆多普勒效应等<sup>[5-7]</sup>。这些超常的电磁特性使超材料在超分辨率成像、隐身斗篷、极化转化器和完美吸收等领域具有重要的应用潜质<sup>[8-11]</sup>, 因此得到了广泛的关注和研究。自 2008 年 Landy 等<sup>[12]</sup>首次设计了微波超材料吸波体, 实现高达 96% 的电磁波能量吸收以来, 其他研究者针对不同频段 (包括微波频段<sup>[12]</sup>、太赫兹频段<sup>[13]</sup>、红外频段<sup>[14]</sup>和可见光频段<sup>[15]</sup>) 的超材料吸波体进行了大量研究, 开发了超材料吸波体在隐身、探测、成像、传感器和太阳能电池等领域的应用。此外, 为拓宽超材料吸波体的应用范围, 就必须实现其可调谐性, 即智能化吸收, 这也是吸波材料目前研究的重要热点。

由于微波频段的波长相对较长, 其可实现性相对容易, 因此适用于微波频段的超材料最先得到研究, 并且已从最初的理论研究逐步发展为应用研究。本文介绍吸波材料的吸波原理、分类及特征, 综述微波频段超材料吸波体的研究进展, 归纳微波频段超材料吸波体的主要调谐方法。

## 1 吸波材料

### 1.1 吸波原理

不考虑散射的情况下, 吸波材料的吸收率  $A(\omega)$  为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (1)$$

其中,  $R(\omega)$  为反射率,  $T(\omega)$  为透射率。

如图 1 所示, 假设电磁波从吸波材料的左端口 1 入射、从右端口 2 透射, 则  $R(\omega)$  和  $T(\omega)$  可表示为

$$R(\omega) = |S_{11}|^2 \quad (2)$$

$$T(\omega) = |S_{21}|^2 \quad (3)$$

通常采用反射系数 (RC) 来描述材料的电磁吸波性能<sup>[4]</sup>

$$RC = 10 \lg(P_r/P_i) \quad (4)$$

其中,  $P_r$  和  $P_i$  分别为反射的电磁波能量和入射电磁波能量。

RC 值越小表示入射电磁波被反射的越少, 材料的吸波性能就越好, 当  $RC = -10$  dB 时, 仅 10% 的电磁波被反射, 90% 的电磁波被吸收。

理想吸波材料需要同时满足阻抗匹配、衰减 2 个基本原则<sup>[16]</sup>: 1) 阻抗匹配原则。材料表层和空气的阻抗匹配, 以减少电磁波的反射, 要求材料的复介电常数和复磁导率接近;

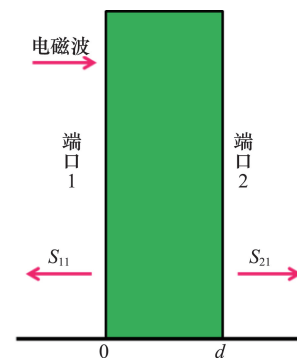


图 1 电磁波入射条件下吸波材料的散射参数

Fig. 1 Scattering parameters of absorbing material under incident of electromagnetic wave

收稿日期: 2016-04-11; 修回日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51332004)

作者简介: 周倩, 博士研究生, 研究方向为吸波超材料, 电子信箱: qianzhou@mail.nwpu.edu.cn; 殷小玮 (通信作者), 教授, 研究方向为结构功能一体化陶瓷复合材料, 电子信箱: yinxw@nwpu.edu.cn

引用格式: 周倩, 殷小玮, 张立同, 等. 微波可调谐超材料吸波体研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 40-46; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.003

2) 衰减原则。进入材料内部的电磁波迅速并几乎全部地被损耗,要求材料具有高的复介电常数和复磁导率。根据传输线理论和金属背板模型<sup>[17]</sup>,反射系数 $RC$ 可表示为

$$RC = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (5)$$

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \tanh \left( j2\pi \sqrt{\mu\epsilon} f d / c \right) \quad (6)$$

其中, $Z_{in}$ 、 $\epsilon$ 、 $\mu$ 分别表示归一化的输入阻抗、介电常数、磁导率, $d$ 为吸波材料的厚度, $f$ 为入射电磁波的频率, $c$ 为真空中的光速。

材料的吸波性能与其电磁参数( $\epsilon$ 和 $\mu$ )、厚度 $d$ 和入射电磁波的频率 $f$ 相关。例如,对于介质损耗型吸波材料,通过计算 $RC$ 与介电函数实部 $\epsilon'$ 和虚部 $\epsilon''$ 的关系<sup>[18]</sup>,得到 $f=10$  GHz, $d=2.86$  mm时, $\epsilon'$ 和 $\epsilon''$ 分别取7.3和3.3时, $RC$ 达到最小值。当材料具有低 $\epsilon'$ (5~20)和中级 $\epsilon''$ (1~10)时,材料表现为电磁吸收特性<sup>[4]</sup>。当 $d$ 为1/4波长的奇数倍时,入射电磁波与反射电磁波在材料表面产生强烈的干涉相消,材料具有最优的吸波效果。

对于超材料吸波体,通过调控超材料的电磁谐振结构单元,使复介电常数( $\epsilon=\epsilon'-j\epsilon''$ )和复磁导率( $\mu=\mu'-j\mu''$ )在谐振频率处趋于相等,从而使其阻抗与自由空间阻抗匹配,入射电磁波在超材料界面不发生反射,从而最大限度地进入材料内部,被超材料吸波体中的金属结构、介质基板和集总元件等消耗,从而实现完美吸收。

### 1.2 吸波材料概述

吸波材料根据损耗机理可分为电损耗型、磁损耗型和其他损耗型3类<sup>[19]</sup>:电损耗型材料主要通过导电性能和介质损耗来吸收电磁波,如导电聚合物<sup>[20, 21]</sup>、SiC纤维<sup>[22, 23]</sup>、石墨<sup>[24]</sup>等;磁损耗型主要通过材料的磁滞损耗、畴壁共振损耗和涡流损耗等吸收电磁波,如铁氧体<sup>[25, 26]</sup>、羰基铁<sup>[27, 28]</sup>、超细金属粉<sup>[29, 30]</sup>等;其他损耗型吸波材料如纳米材料<sup>[31, 32]</sup>、手性材料<sup>[33]</sup>、等离子

体材料<sup>[34]</sup>和超材料<sup>[35, 36]</sup>等。表1<sup>[19]</sup>为吸波材料的分类及各类吸波材料的特征。其中电损耗型吸波材料一般具有密度低、力学性能优异、耐高温等优点,但是吸波性能较差、吸波频带较窄。磁损耗型吸波材料一般具有吸波性能好、吸波频带宽的优点,但缺点是密度较大、高温稳定性较差。纳米吸波材料可以与结构材料或涂层相融合,兼备密度低、吸收强、频带宽和力学性能优异等优点,是一种很有发展前途的吸波材料,但是制备工艺复杂、成本高、吸波机制不明确等问题都有待后续研究加以解决。虽然研究者一直在努力寻找和研制厚度薄、质量轻、吸收频带宽、吸收强的电磁吸波材料,但目前的结果还不是很理想,而超材料吸波体的出现有望解决这一难题。

## 2 微波超材料吸波体

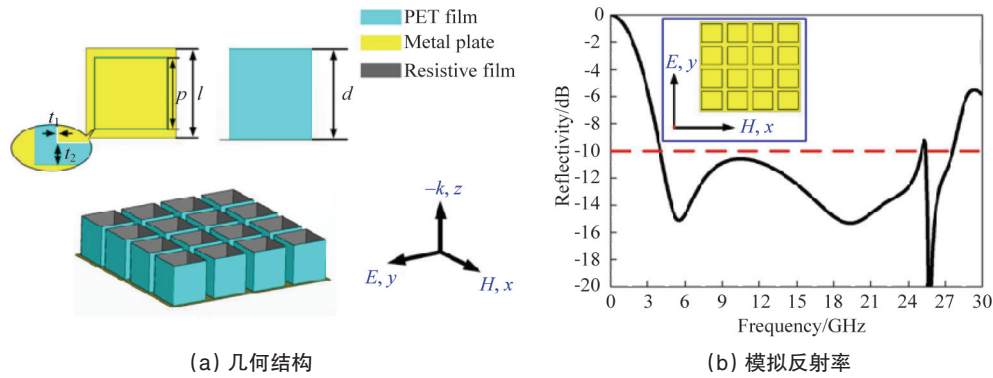
与通常设计超材料时要尽量避免损耗不同,超材料吸波体的强谐振损耗对于超材料在吸波领域的应用具有重要的作用。根据损耗机制,超材料吸波体可分为基于电谐振、基于磁谐振和基于电路谐振的超材料吸波体。基于电谐振和磁谐振的超材料吸波体主要依赖金属结构单元的电磁谐振来吸波,仅能在谐振频率处较窄的频带内实现与自由空间的近似阻抗匹配,因而吸波频带较窄。基于电路谐振的超材料吸波体主要通过金属结构上加载集总元件将电磁谐振转为电路谐振,电路谐振相对于频率的变化更稳定,可用来实现宽频带吸收。根据频率响应范围超材料吸波体可分为微波、太赫兹、红外和可见光超材料吸波体。由于微波超材料吸波体的结构尺寸大多处于毫米量级,因此其可实现性强,通常采用电路板印刷技术来加工和制造。太赫兹、红外和可见光频段超材料吸波体的结构尺寸通常位于微米和纳米量级,通常采用光刻技术或电子束光刻技术来实现加工和制造。虽然目前针对超材料吸波体的吸收频率可调<sup>[37, 38]</sup>、吸收强度可调<sup>[39]</sup>、极化不敏感吸收<sup>[40-42]</sup>、宽入射角吸收<sup>[43, 44]</sup>、宽频带吸收<sup>[45-47]</sup>和多频带吸收<sup>[48, 49]</sup>等方面进行了大量研究,也取得了诸多进展,但是其仍然具有尺寸厚、极化依赖性强,综合性能差等缺点,尤其是在微波频段,限制了其潜在的应用,需要有效解决。

Shen等<sup>[50]</sup>设计和制备了一种三维极宽频超轻电阻膜型微波超材料吸波体(图2<sup>[50]</sup>),这种超材料利用导电碳浆通过丝网印刷技术印刷于0.1 mm薄膜得到,制备的试样密度只有0.062 g/cm<sup>3</sup>,在3.9~26.2 GHz频率范围反射率小于-10 dB,极大地拓宽了吸波体的吸收频带。这种设计结构与将蜂窝结构吸波体沉积于高损耗的碳材料<sup>[51, 52]</sup>的设计非常相似,因此可以将传统吸波材料的设计思路与超材料的设计思路相结合设计出性能更优异的吸波材料。Li等<sup>[45]</sup>将平面超材料结构与磁性吸波材料相结合,成功地控制和拓宽了吸波体的吸收频带,使其在2~18 GHz频率范围反射率小于-10 dB。此外,Jang等<sup>[53]</sup>设计了一种透明极化不敏感的微波超材料吸波体

表1 吸波材料的分类和特征

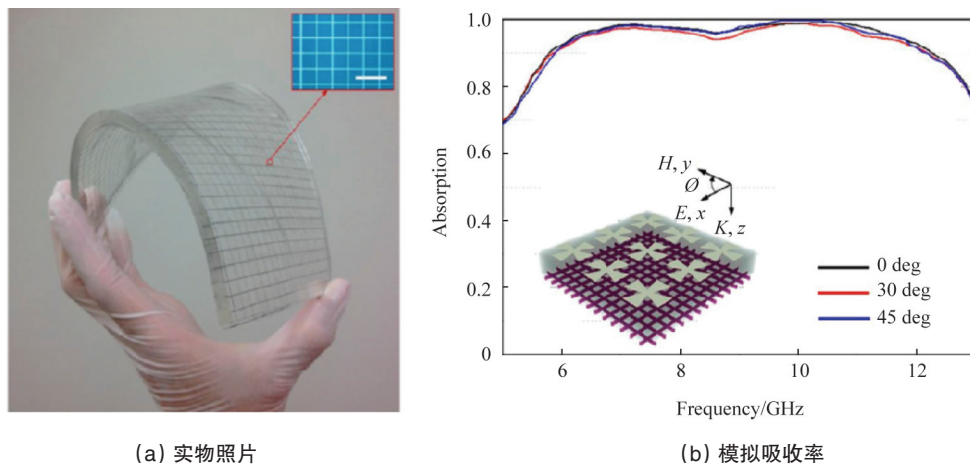
Table 1 Classification and characteristics of absorbing materials

	分类	密度低	频带宽	吸收强	力学性能优异	成本低	热稳定性
电损耗型	导电聚合物	√	×	×	√	×	×
	碳系吸收剂	√	×	×	√	√	√
	SiC纤维	√	×	×	√	×	√
磁损耗型	铁氧体	×	√	√	×	√	×
	羰基铁	×	√	√	×	×	×
	超细金属粉	×	√	√	×	×	×
其他损耗型	纳米材料	√	√	√	√	×	×
	手性材料	√	×	×	-	-	-
	等离子体材料	-	√	√	-	×	-
	超材料	-	√	√	√	-	-



(a) 几何结构 (b) 模拟反射率  
图2 三维微波超材料吸波体

Fig. 2 A three-dimensional microwave metamaterial absorber



(a) 实物照片 (b) 模拟吸收率

图3 透明极化不敏感的微波超材料吸波体

Fig. 3 Transparent and flexible polarization-independent microwave absorber

(图3),其在5.8~12.2 GHz频率范围反射率小于-10 dB,通过调节蝴蝶结形状的结构单元的尺寸和多层设计,使其在3.8~19.2 GHz频率范围反射率小于-10 dB。以上的三维和蝴蝶结状结构设计以往采用的多层结构设计来拓宽吸收频带相比,克服了吸波体尺寸厚、制备工艺复杂的缺点。

目前,针对微波频段超材料吸波体的宽频带吸波、多频带吸波、极化不敏感吸波、宽入射角吸波研究已经取得了诸多突破<sup>[12,38,39,45,47,50,53,54]</sup>,而关于超材料吸波体的可调谐性,即实现其智能化吸收仍需要进一步的研究。

### 3 微波可调谐超材料吸波体

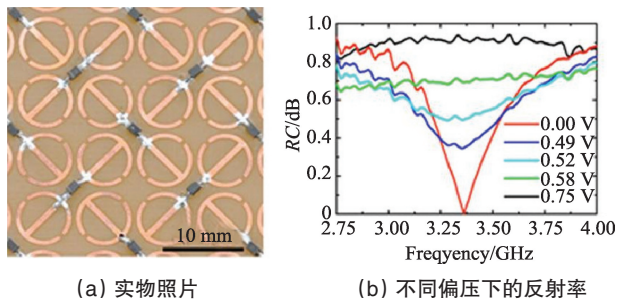
目前,大部分的超材料吸波体都是通过谐振单元周期排列在固体材料上制备,超材料吸波体一旦合成,其结构就不能够再发生变化,这就导致其频率响应和吸收强度被限定,也就是说,此类吸波体缺乏适应性和可调谐性。为拓宽超材料吸收体的应用范围,尤其是宽频段的无线通信系统,包括新兴的认知无线电系统和智能雷达系统<sup>[54]</sup>,就必须实现吸收的可调谐性。目前实现超材料吸收可调谐的方式主要有两类<sup>[55]</sup>:一类是通过谐振器或基板的非线性效应改变超材料的有效电磁特性;另一类是通过超材料的结构重构,如结构单

元的变形、旋转或弯曲等来改变超材料的电磁特性。

#### 3.1 基于可变电容的微波可调谐超材料吸波体

超材料吸波体可以通过共振结构单元之间产生的电容电感进行谐振吸收。因此,在结构单元中加载变容二极管,就可以通过改变电压或电流来控制整个结构的电容,从而改变共振频率,拓宽吸收频带,实现超材料吸波体的智能吸收。

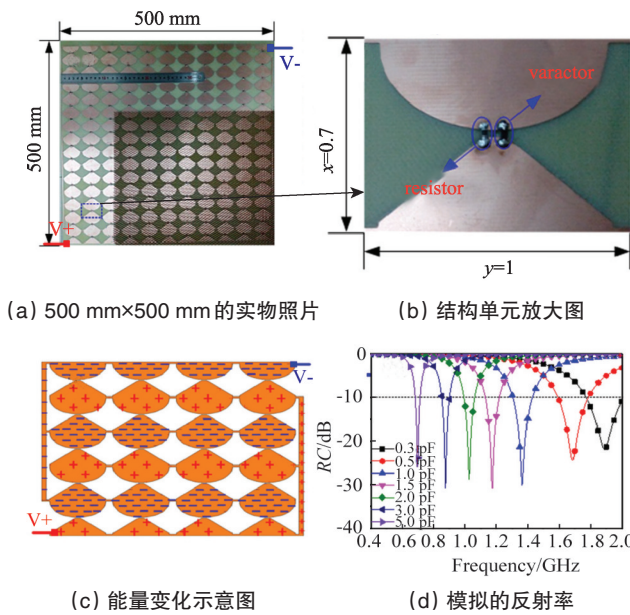
Gil等<sup>[56]</sup>首次提出了将加载变容二极管的金属开口谐振环与微带线结构耦合,实现了传输线结构超材料的可调谐性。之后的研究者设计并实验验证了一系列加载变容二极管的超材料。Kotsuka等<sup>[57]</sup>将二极管加载于超材料中,分别设计了二维和三维的可控吸波体,实现了1.3~4.25 GHz频段内的可控性吸收。如图4<sup>[58]</sup>所示,Zhu等<sup>[58]</sup>将二极管加载于超材料吸波体中,设计了一种可调谐的超材料吸收/反射体并通过了实验证实,该超材料对入射电磁波的极化方向不敏感,此外通过调节二极管两端的电压,可以实现电磁波的全吸收、部分吸收以及全反射。如图5<sup>[59]</sup>所示,Xu等<sup>[59]</sup>设计和制备了一种加载电阻和电容的活性频率选择表面吸波体,在10~48 V的偏压范围内实现了0.7~1.9 GHz的频率范围的反射率小于-10 dB,并且吸波体的总厚度为7.8 mm,约为中心频率处的1/29波长。



(a) 实物照片 (b) 不同偏压下的反射率

图4 加载二极管的超材料吸收/反射体

Fig. 4 Metamaterial absorber/reflector with diodes



(a) 500 mm×500 mm的实物照片 (b) 结构单元放大图

(c) 能量变化示意图 (d) 模拟的反射率

图5 活性频率选择表面吸波体

Fig. 5 Fabricated active frequency selective surface absorber

虽然加载变容二极管可以实现超材料吸波体的可调谐性,但是在光学器件中耦合二极管在样品制备过程中几乎不可能实现,同时二极管的阻抗匹配依赖于频率,使得较宽频段的阻抗匹配难以实现。

### 3.2 基于石墨烯的可调谐超材料吸波体

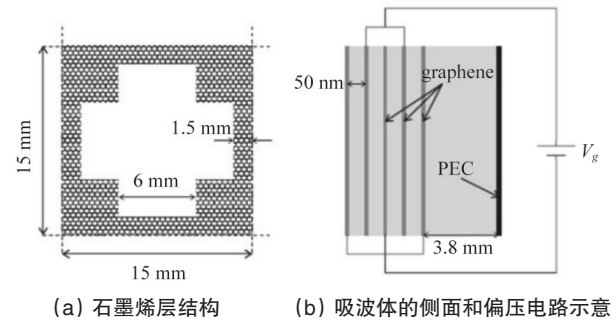
在超材料吸波体中加入石墨烯是另外一种实现吸收可调的重要方式,这是由于石墨烯的费米能级和电导率可以通过电磁场来调控,并且在微波频段,石墨烯的表面阻抗与频率无关可实现宽频可调谐<sup>[60]</sup>。目前,关于石墨烯在可调谐超材料吸波体中的研究主要集中在太赫兹和更高频率的红外和光波频段<sup>[61-66]</sup>,这是因为与贵金属相比,石墨烯在这些频段支持表面等离子体激元,石墨烯表面等离子体激元可以极大地增强电磁波与石墨烯之间的相互作用。微波频段的波长相对较长,因此此频段需要面积更大、品质更高的石墨烯,从而限制了石墨烯在微波频段的应用。随着高品质、大面积的化学气相沉积(CVD)石墨烯的商业化生产,石墨烯在微波可调谐超材料中的应用潜质有条件得到更大程度的开发。

CVD 石墨烯的表面阻抗约为  $400\sim 3000 \Omega$ <sup>[67, 68]</sup>,与自由空间的阻抗  $377 \Omega$  容易实现匹配,此外,石墨烯的表面阻抗可调,可实现宽频可调谐性。这些都为石墨烯基微波可调谐超材料吸波体的研究和应用提供了更多可能。

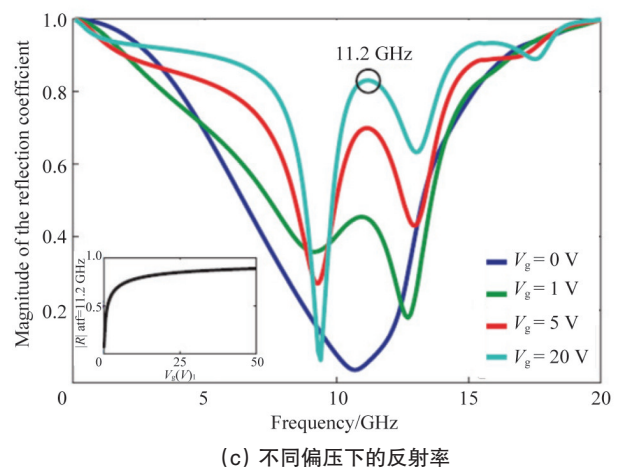
2012年, Fallahi 和 Perruisseau-Carrier<sup>[69]</sup>从理论上分析了周期性石墨烯构成的电磁超表面可以动态控制电磁波的反射,吸收和极化规律,并证实了石墨烯在微波频段到红外频段的应用潜能。图6<sup>[69]</sup>为他们设计的一种石墨烯微波超吸波体结构,该结构由五层结构石墨烯印刷于SiO<sub>2</sub>基板构成,利用偏置电压可以控制吸波体的反射率。2014年, Huang等<sup>[60]</sup>设计了一种基于石墨烯的可调雷达吸收屏,图7(a)<sup>[60]</sup>为吸收屏的结构示意图,该吸收屏由希尔伯特曲线金属条阵列和化学气相沉积的石墨烯层组成,实现了8.9~18.1 GHz的宽频带吸收(图7(b)),图7(c)为加载与不加石墨烯对吸收屏吸收率的影响关系图,石墨烯对吸收屏的吸收具有显著的影响,石墨烯层直接位于金属条阵列下方,起到了可调谐性和平均表面阻抗的作用,从而实现了宽频带的阻抗匹配和吸收。

虽然目前关于石墨烯在微波超材料吸波体中的研究非常少,但是理论计算和设计上均已验证了石墨烯作为微波频段可调谐超材料的可行性,因此石墨烯基微波可调谐超材料将是一个重要的研究方向。

值得关注的是,将电磁性能可调的智能材料与超材料相结合实现超材料可调谐性是另一种重要的设计思路。实验



(a) 石墨烯层结构 (b) 吸波体的侧面和偏压电路示意



(c) 不同偏压下的反射率

图6 五层石墨烯印刷于SiO<sub>2</sub>基板示意

Fig. 6 Schematic illustration of the absorber structure consisting of five graphene layers printed on a glass substrate

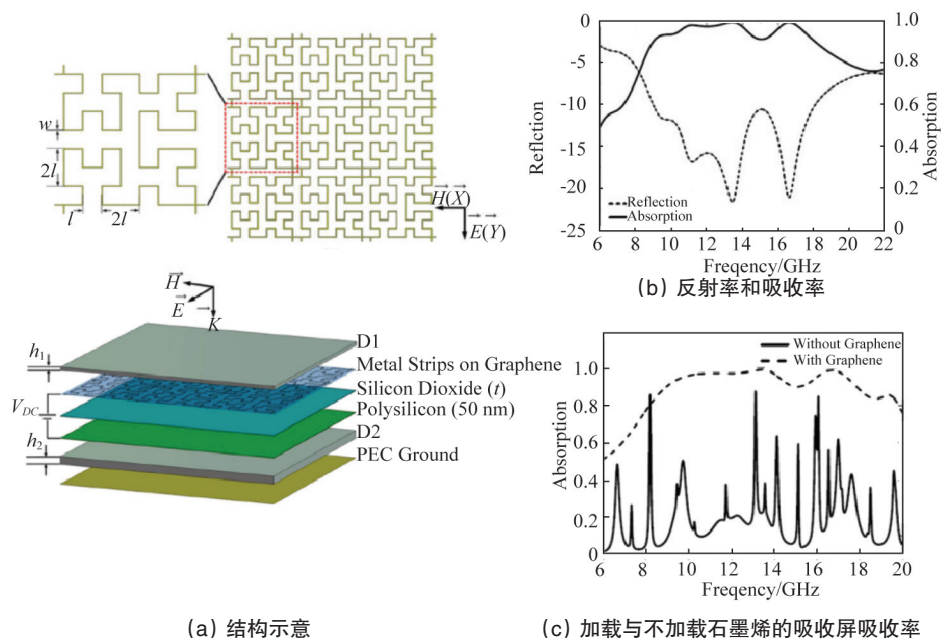


图7 基于石墨烯的可调雷达吸收屏

Fig. 7 Graphene based tunable radar absorbing screen

上已证实陶瓷和碳基材料具有可调谐的微波反射系数<sup>[4]</sup>,其介电函数的实部和虚部均存在可调性,类似的智能材料可以利用SiC纳米线增强SiOC陶瓷<sup>[70]</sup>、碳纳米管CNTs增强SiO<sub>2</sub>陶瓷<sup>[71]</sup>、CNTs-ZnO增强SiO<sub>2</sub><sup>[72]</sup>和CNTs增强Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub><sup>[73]</sup>制备,所以陶瓷和碳基材料在智能超材料领域具有潜在应用。

#### 4 结论

微波超材料吸波体在隐身、探测、成像、传感器和太阳能电池等领域具有重要的应用潜质,关于可调谐性研究微波超材料吸波体也取得很多成果,但是这些研究仍然停留在理论和试验阶段,在实际应用中仍存在一些缺陷,其性能仍需进一步的提高。在未来的发展中,微波可调谐超材料吸波体的研究应关注以下几个方面。

- 1) 对现有结构进行进一步的改进和优化,使可调谐的频率范围和灵活性得到进一步的提高。
- 2) 设计超材料吸波体时,在实现可调谐性的同时能够实现宽频吸收、极化不敏感吸收和宽入射角吸收等特点。
- 3) 设计超材料吸波体时,在保留特殊性质的同时向简单结构发展,从而使实际化生产应用便于实现。
- 4) 将传统的吸波材料与超材料吸波体相结合,尤其是将超材料与陶瓷基和碳基智能材料相结合使吸波材料的综合性能得到进一步的提高,并实现其可调谐性。
- 5) 设计雷达和红外的兼容性超材料吸波体,并实现其可调谐性。

#### 参考文献 (References)

[1] De Rosa I M, A Dinescu, F Sarasini, et al. Effect of short carbon fibers and MWCNTs on microwave absorbing properties of polyestercomposites

containing nickel-coated carbon fibers[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(1): 102-109.

[2] Huynen I, Quievy N, Bailly C, et al. Multifunctional hybrids for electromagnetic absorption[J]. Acta Materialia, 2011, 59(8): 3255-3266.

[3] Kong L B, Li Z W, Liu L, et al. Recent progress in some composite materials and structures for specific electromagnetic applications[J]. International Materials Reviews, 2013, 58(4): 203-259.

[4] Yin X W, Kong L, Zhang L T, et al. Electromagnetic properties of Si-C-N based ceramics and composites[J]. International Materials Reviews, 2014, 59(6): 326-355.

[5] Smith D R, Schurig D. Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(7): 077405.

[6] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. Science, 2006, 312(5781): 1780-1782.

[7] Zheludev N I. The Road Ahead for Metamaterials[J]. Science, 2010, 328 (5978): 582-583.

[8] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. Science, 2005, 308(5721): 534-537.

[9] Chen H S, Zheng B, Shen L, et al. Ray-optics cloaking devices for large objects in incoherent natural light[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2562.

[10] Zhang S, Zhou J F, Park Y S, et al. Photoinduced handedness switching in terahertz chiral metamolecules[J]. Nature Communications, 2012, 3: 942.

[11] Landy N I, Sajuyigbe s, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.

[12] Li S J, Gao J, Cao X Y, et al. Hybrid metamaterial device with wideband absorption and multiband transmission based on spoof surface plasmon polaritons and perfect absorber[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(18): 181103.

[13] Su Z X, Yin J B, Zhao X P. Terahertz dual-band metamaterial absorber based on graphene/MgF<sub>2</sub> multilayer structures[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 1679-1690.

- [14] Avitzour Y, Urzhumov Y A, Shvets G. Wide-angle infrared absorber based on a negative-index plasmonic metamaterial[J]. *Physical Review B*, 2009, 79(4): 045131.
- [15] Liu Z Q, Liu X S, Huang S, et al. Automatically acquired broadband plasmonic-metamaterial black absorber during the metallic film-formation[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(8): 4962-4968.
- [16] 庞建峰, 马喜君, 谢兴勇. 电磁吸波材料的研究进展[J]. *电子元件与材料*, 2015, 34(2): 7-16.  
Pang Jianfeng, Ma Xijun, Xie Xingyong. Research progress of microwave absorption materials[J]. *Electronic Components and Materials*, 2015, 34(2): 7-16.
- [17] Miles P A, Westphal W B, Vonhippel A. Dielectric spectroscopy of ferromagnetic semiconductors[J]. *Reviews of Modern Physics* 1957, 29(3): 279-307.
- [18] Kong L, Yin X W, Ye F, et al. Electromagnetic wave absorption properties of ZnO-Based materials modified with ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanograins [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(5): 2135-2146.
- [19] 陈雪刚, 叶瑛, 程继鹏. 电磁波吸收材料的研究进展[J]. *无机材料学报*, 2011, 26(5): 449-457.  
Chen Xuegang, Ye Ying, Cheng Jipeng. Recent progress in electromagnetic wave absorbers[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, 26(5): 449-457.
- [20] Zhu Y F, Zhang L, Natsuki T, et al. Synthesis of hollow poly(aniline-co-pyrrole)-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite nanospheres and their microwave absorption behavior[J]. *Synthetic Metals*, 2012, 162(3-4): 337-343.
- [21] Belaabed B, Wojkiewicz J L, Lamouri S, et al. Synthesis and characterization of hybrid conducting composites based on polyaniline/magnetite fillers with improved microwave absorption properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 527: 137-144.
- [22] Wan F, Luo F, Wang H Y, et al. Effects of carbon black (CB) and alumina oxide on the electromagnetic- and microwave-absorption properties of SiC fiber/aluminum phosphate matrix composites[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(10): 15849-15857.
- [23] Alamri H, Low I M. Effect of water absorption on the mechanical properties of n-SiC filled recycled cellulose fibre reinforced epoxy eco-nanocomposites[J]. *Polymer Testing*, 2012, 31(6): 810-818.
- [24] Wen B, Zhao J J, Duan Y P, et al. Electromagnetic wave absorption properties of carbon powder from catalysed carbon black in X and Ku bands[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2006, 39(9): 1960-1962.
- [25] Liu Y, Liu X, Wang X. Synthesis and microwave absorption properties of Ni-Zn-Mn spinel ferrites[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2015, 114(2): 82-86.
- [26] Ali-Sharbat, Amiri G R, Mousarezaei R. Structural, magnetic, and microwave-absorption properties of nanocrystalline Ca(MnSn)<sub>0.9</sub>Fe<sub>12-2x</sub>O<sub>19</sub> ferrites[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(2): 715-719.
- [27] Yu M, Yang P A, Fu J, et al. Flower-like carbonyl iron powder modified by nanoflakes: Preparation and microwave absorption properties[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16):161904.
- [28] Li R, Zhou W C, Zhou Y Y, et al. Electromagnetic and microwave absorption properties and antioxidant properties of Co-P coating on carbonyl iron[J]. *Optoelectronics and Advanced Materials- Rapid Communications*, 2015, 9(1-2): 231-233.
- [29] Cui C Y, Zhou P P, Wu N D, et al. Microwave absorption properties of Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> nanoparticles-modified Ni@C nanocapsules[J]. *Materials Letters*, 2015, 161: 325-327.
- [30] Ye W C, Fu J J, Wang Q, et al. Electromagnetic wave absorption properties of NiCoP alloy nanoparticles decorated on reduced graphene oxide nanosheets[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 395: 147-151.
- [31] Najim M, Smitha P, Agarwala V, et al. Design of light weight multi-layered coating of zinc oxide-iron-graphite nano-composites for ultra-wide Bandwidth microwave absorption[J]. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2015, 26(10): 7367-7377.
- [32] Jiang J J, Yang C M, Wang H B, et al. Preparation and microwave absorption performance of polyaniline/CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nano-composite by coordination-oxidative polymerization-hydrothermal method[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities-Chinese*, 2014, 35(2): 402-408.
- [33] Sun G C, Yao K L, Liao H X, et al. Microwave absorption characteristics of chiral materials with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>- polyaniline composite matrix[J]. *International Journal of Electronics*, 2000, 87(6): 735-740.
- [34] Hibbins A P, Murray W A, Tyler J, et al. Resonant absorption of electromagnetic fields by surface plasmons buried in a multilayered plasmonic nanostructure[J]. *Physical Review B*, 2006, 74(7): 073408.
- [35] Li S J, Gao J, Cao X Y, et al. Multiband and broadband polarization-insensitive perfect absorber devices based on a tunable and thin double split-ring metamaterial[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3523-3533.
- [36] Wang N, Tong J M, Zhou W C, et al. Novel quadruple-band microwave metamaterial absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1):5500506.
- [37] Zhao J, Cheng Q, Chen J, et al. A tunable metamaterial absorber using varactor diodes[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15: 043049.
- [38] Xu W R, Sonkusale S. Microwave diode switchable metamaterial reflector/absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(3): 031902.
- [39] Wu X Y, C G Hu, Y Q Wang, et al. Active microwave absorber with the dual-ability of dividable modulation in absorbing intensity and frequency[J]. *Aip Advances*, 2013, 3(2): 022114.
- [40] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, et al. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging[J]. *Physical Review B*, 2009, 79(12): 125104.
- [41] Li L, Yang Y, Liang C H. A wide-angle polarization-insensitive ultrathin metamaterial absorber with three resonant modes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(6): 063702.
- [42] Zhou W C, Li K W, Song C, et al. Polarization-independent and omnidirectional nearly perfect absorber with ultra-thin 2D subwavelength metal grating in the visible region[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): A413-A418.
- [43] Duan X Y, Chen S Q, Yang H F, et al. Polarization-insensitive and wide-angle plasmonically induced transparency by planar metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 143105.
- [44] Chen S Q, Cheng H, Yang H F, et al. Polarization insensitive and omnidirectional broadband near perfect planar metamaterial absorber in the near infrared regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(25): 253104.
- [45] Li W, Wu T L, Wang W, et al. Integrating non-planar metamaterials with magnetic absorbing materials to yield ultra-broadband microwave hybrid absorbers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(2): 022903.
- [46] Wang B Y, Liu S B, Bian B R, et al. A novel ultrathin and broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(9):094504.
- [47] Hao J P, Lheurette É, Burgnies L, et al. Bandwidth enhancement in disordered metamaterial absorbers[J]. *Applied Physics Letters*, 2015,

- 105: 081102.
- [48] Li H, Yuan L H, Zhou B, et al. Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(1): 014909.
- [49] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, et al. Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(4): 044902.
- [50] Shen Y, Pei Z B, Pang Y Q, et al. An extremely wideband and lightweight metamaterial absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(22): 224503.
- [51] Choi W H, Shin J H, Song T H, et al. Design of broadband microwave absorber using honeycomb structure[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(4): 292-U135.
- [52] Khurram A A, Ali N, Rakha S A, et al. Optimization of the carbon coating of honeycomb cores for broadband microwave absorption[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2014, 56(5): 1061-1066.
- [53] Jang T, Youn H, Shin Y J, et al. Transparent and flexible polarization-independent microwave broadband absorber[J]. *Acs Photonics*, 2014, 1(3): 279-284.
- [54] Yuan H, Zhu B O, Feng Y. A frequency and bandwidth tunable metamaterial absorber in x-band[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(17): 173103.
- [55] Liu A Q, Zhu W M, Tsai D P, et al. Micromachined tunable metamaterials: A review[J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(11): 114009.
- [56] Gil I, Bonache J, Garcia-Garcia J, et al. Tunable metamaterial transmission lines based on varactor-loaded split-ring resonators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(6): 2665-2674.
- [57] Kotsuka Y, Murano K, Amano M, et al. Novel right-handed metamaterial based on the concept of "autonomous control system of living cells" and its absorber applications[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, 52(3): 556-565.
- [58] Zhu B, Feng Y J, Zhao J M, et al. Polarization modulation by tunable electromagnetic metamaterial reflector/absorber[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23196-23203.
- [59] Xu W H, He Y, Kong P, et al. An ultra-thin broadband active frequency selective surface absorber for ultrahigh-frequency applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(18): 184903.
- [60] Huang X J, Hu Z R, Liu P G. Graphene based tunable fractal Hilbert curve array broadband radar absorbing screen for radar cross section reduction[J]. *Aip Advances*, 2014, 4(11): 117103.
- [61] Grigorenko A N, Polini M, Novoselov K S. Graphene plasmonics[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(11): 749-758.
- [62] Ju L, Geng B S, Horng J, et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(10): 630-634.
- [63] Vakil A, Engheta N. Transformation optics using graphene[J]. *Science*, 2011, 332(6035): 1291-1294.
- [64] Zhu W R, Rukhlenko I D, Si L M, et al. Graphene-enabled tunability of optical fishnet metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(12): 121911.
- [65] Woo J M, Kim M S, Kim H W, et al. Graphene based salisbury screen for terahertz absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(8): 081106.
- [66] Ning R X, Bao J, Jiao Z, et al. Omnidirectional polarization insensitive tunable absorption in graphene metamaterial of nanodisk structure[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117: 203101.
- [67] Skulason H S, Nguyen H V, Guermoune A, et al. 110 GHz measurement of large-area graphene integrated in low-loss microwave structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(15): 153504.
- [68] Gomez-Diaz J S, Perruisseau-Carrier J. Propagation of hybrid transverse magnetic-transverse electric plasmons on magnetically biased graphene sheets[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(12): 124906.
- [69] Fallahi A, Perruisseau-Carrier J. Design of tunable bi-periodic graphene metasurfaces[J]. *Physical Review B*, 2012, 86(19): 195408.
- [70] Duan W Y, Yin X W, Li Q, et al. Synthesis and microwave absorption properties of SiC nanowires reinforced SiOC ceramic[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, 34(2): 257-266.
- [71] Wen B, Cao M S, Hou Z L, et al. Temperature dependent microwave attenuation behavior for carbon-nanotube/silica composites[J]. *Carbon*, 2013, 65: 124-139.
- [72] Liu Y, Yin X W, Kong L, et al. Electromagnetic properties of SiO<sub>2</sub> reinforced with both multi-wall carbon nanotubes and ZnO particles [J]. *Carbon*, 2013, 64: 541-544.
- [73] Liu X M, Yin X W, Zheng G P, et al. In-situ formation of carbon nanotubes in pyrolytic carbon-silicon nitride composite ceramics[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(1): 531-540.

## Research progress of microwave tunable metamaterial absorber

ZHOU Qian, YIN Xiaowei, ZHANG Litong, CHENG Laifei

Science and Technology on Thermostructural Composite Materials Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

**Abstract** With the development of electromagnetic interference protection technique and military stealth technique, absorbing materials have become an important subject of scientific research. In this paper, the principle of metamaterial absorber as well as the classification of absorbing materials is introduced, and the progress of microwave metamaterial absorbers designed for microwave frequencies is outlined. Particularly, theoretic and experimental studies on tunable metamaterial absorbers are summarized, and the development trend of metamaterial in tunable absorbers is prospected.

**Keywords** tunability; microwave; metamaterials; absorber

(责任编辑 刘志远)